



TITLE:

部材の破壊進展と構造物の不静定性を考慮した開削トンネルの耐震性向上に関する研究(Abstract\_要旨)

AUTHOR(S):

川西, 智浩

---

CITATION:

川西, 智浩. 部材の破壊進展と構造物の不静定性を考慮した開削トンネルの耐震性向上に関する研究. 京都大学, 2019, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2019-03-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r13236>

RIGHT:

京都大学	博 士 (工 学)	氏名	川 西 智 浩
論文題目	部材の破壊進展と構造物の不静定性を考慮した開削トンネルの耐震性向上に関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、開削トンネルにおける部材の破壊進展と構造物の不静定性を考慮して開削トンネルの耐震性能を合理的に評価するとともに、開削トンネルの構造的特徴を踏まえた対策法を提案することを目的として、まず応答解析・評価法の観点からは「構造物単体系」における耐震性評価法の検討、および「地盤－構造物全体系」における構造物の破壊形態の確認を精緻に行う方法について検討した。また、耐震対策については、開削トンネルの特徴を生かした耐震対策の提案を行った。</p> <p>第1章では、本研究の背景と目的を述べるとともに、本研究に関係する既往の研究を整理し、その結果を踏まえて研究の課題を述べたうえで本論文の構成を示した。</p> <p>第2章では、構造物単体系の応答解析の評価法の検討を行うため、開削トンネルの不静定性と部材の破壊進展に着目し、開削トンネルの構成部材がせん断破壊を起こした場合に、トンネル全体系の抵抗力がどのように影響を受けるかを検討することを目的として、トンネルの縮小模型を用いた載荷実験を行うとともに、梁ばねモデルを用いた載荷実験のシミュレーションを行った。その結果、載荷実験により、中壁がせん断破壊するとトンネル全体系の抵抗力の低下が大きく、トンネル全体として大きな破壊につながる恐れがあることがわかった。一方、側壁がせん断破壊するケースについては、上下床版に損傷が生じない条件となっている今回の実験条件下の結果ではあるが、中壁が大きく損傷しなければ一定の抵抗力を維持できる可能性があることを示した。この結果、補強として優先すべきなのは側壁よりも中壁（中柱）であり、中壁（中柱）の補強により崩壊を免れる可能性が高まることがわかった。また、載荷実験のシミュレーションにより、開削トンネル部材がせん断破壊する場合のトンネル全体系の抵抗力低下量は、当該部材を無視したモデルへの荷重－変位関係への乗り移り、あるいはせん断破壊する部材に対して耐力消失型の <math>M-\theta</math> 関係を用いることで概ね表現できることがわかった。ただし、荷重－変位関係の乗り移りによりせん断破壊時の挙動を追跡できるのは、せん断破壊する部材を無視しても常時状態の荷重を支えることができる場合に限られる。また、本検討では上下床版を剛体としているが、地盤中の開削トンネルでは、地震時にこれらの部材も変形することから、当然ながら実際には上下床版の照査も必須となることに注意が必要である。</p> <p>第3章では、構造物単体系の評価法のさらなる検討として、トンネルの構成部材が損傷を受け当該部材の耐力が低下した場合に、その他の部材の耐力に余裕がある場合にはそれらの部材に応力が再配分される点に着目し、トンネル構成部材が損傷を受けた場合の応力再配分について検討を行った。その結果、左右側壁が損傷する場合には主に中壁の部材力が増加することから、中壁の耐力を増大させる、あるいは中柱の変形性能を伸ばすように耐震設計を実施する、あるいは耐震対策をしておくことで、さらなる被害拡大の防止を図ることができることがわかった。次に、中壁が損傷する場合、左右両方の側壁の部材力が増加するため、両側壁に対して耐力を増大させる、あるいは変形性能を伸ばすように耐震設計を実施する、あるいは耐震対策をしておくことが求められるが、側壁は片方が土に接しており既設構造物の耐震対策に制約がある</p>			

京都大学	博 士 (工 学)	氏名	川 西 智 浩
<p>こと、および中壁が上部からの荷重を支える主要部材であることを踏まえると、中壁を損傷させることは望ましくないことがわかった。最後に、上下床版の部材が損傷した場合、それまで損傷していない上下床版部材のうち、対角線方向にある部材を除く部材において、部材力が増加する。また、上下床版も片方が土に接しているため既設構造物の耐震対策に制約があることから、上下床版部材を損傷させることはあまり望ましくなく、特に上床版は上部からの荷重が直接作用する部材であることから、大きい損傷をさせないよう、注意が必要であることがわかった。</p> <p>第4章では、地盤－構造物一体型モデルの解析法の検討として、開削トンネルの破壊形態を確認する静的解析法のうち FEM 系静的解析法の一つである応答震度法を取り上げ、地盤の非線形性や加速度の設定方法がトンネルの応答に及ぼす影響について、動的解析との比較により解析的検討を実施した。その結果、応答震度法において地盤を非線形として取り扱い、動的解析における着目時刻の加速度をそのまま用いた場合には、自然地盤のせん断ひずみが過小評価となるため、トンネルの応答も動的解析に比べて小さくなる危険性があることがわかった。一方、応答震度法における地盤を等価線形として設定した場合には、地盤を非線形として扱った場合に比べて最終ステップに至るまでの地盤のせん断剛性が過小に評価され、トンネルの応答にも影響を及ぼす可能性があるものの、動的解析と応答震度法の応答の差異はそれほど大きくないことから、耐震の評価結果にほとんど余裕がないような場合を除けば、十分有用であることを示した。さらに、最大せん断応力から換算した加速度を用いることにより、地盤を非線形とした応答震度法でも、動的解析の着目時刻における応答を概ね再現することができることを示した。</p> <p>第5章では、開削トンネルの耐震対策法を2つのアプローチから検討した。第一の検討として、開削トンネルが周囲を地盤に囲まれており、その変形量に限りがあるという特性を生かし、トンネルにおける鉄筋の付着を切った新しい構造形式の提案を行った。解析的検討の結果、鉄筋の付着強度を弱めることにより開削トンネルでは、特に地盤に比べてトンネルが大きく変形するケースにおいて、鉄筋の付着強度を弱めることでトンネルの変形が頭打ちになり、大きく曲げ損傷する部材の損傷が抑制されるとともに、各部材のせん断力が低下することから、せん断破壊を防止できる効果もあり、提案手法が耐震対策法として有効であることを示した。ただし、応力再配分の影響で、他部材の損傷が多少進行する可能性があることには注意が必要であることもわかった。次に第二の検討として、開削トンネルにおいて曲げによる損傷が生じるのは主に隅角部付近であることに着目し、隅角部付近の地盤剛性を低下させる構造形式を提案した。解析的検討の結果、隅角部付近の地盤剛性を小さくすることで、トンネル部材の部材力や変形が低減できる可能性があり、提案手法の有効性を示した。ただし、トンネル下部の地盤剛性が弱くする場合にはトンネルの安定性には注意が必要であるうえ、施工性の観点でも課題があることから、これらの観点を考慮し、トンネル上部の隅角部周辺のみ地盤剛性を小さくする方法についても検討した。その場合、部材の断面力低減効果は上床版や側壁上部の隅角部にのみ見られることから、トンネルの安定性や施工イメージを踏まえると、隅角部周辺の地盤を軟らかくする改良工法は、上床版、側壁上部の耐震診断結果が厳しい場合に有効であることがわかった。</p> <p>第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

兵庫県南部地震において中柱のせん断破壊により開削トンネルが崩落した後、緊急耐震補強として開削トンネルの中柱のせん断補強が進められた。一方、中柱・中壁以外の部材については、開削トンネルが不静定構造物であることから、それらの部材が損傷した場合にトンネル全体系が破壊するかどうか明確でなく、耐震対策も進んでいない。本研究はこのような背景を踏まえ、開削トンネルにおける部材の破壊進展と構造物の不静定性を考慮して開削トンネルの耐震性能を合理的に評価するとともに、開削トンネルの構造的特徴を踏まえた対策法を提案することを目的として実施したものである。本研究で行った事および得られた成果は以下の通りである。

1. トンネルの縮小模型を用いた載荷実験を行うとともに、梁ばねモデルを用いた載荷実験のシミュレーションを行い、中壁がせん断破壊するとトンネル全体系の抵抗力の低下が大きく、トンネル全体として大きな破壊につながる恐れがある一方、側壁がせん断破壊するケースについては、中壁が大きく損傷しなければ一定の抵抗力を維持できる可能性があることを示した。また、開削トンネル部材がせん断破壊する場合のトンネル全体系の抵抗力低下量を把握する方法を示した。
2. トンネル構成部材が損傷を受けた場合の応力再配分について解析的検討を行い、特に左右側壁が損傷する場合には主に中壁の部材力が増加することから、中壁の耐力を増大させる、あるいは中柱の変形性能を伸ばすように耐震設計を実施する、あるいは耐震対策をしておくことで、さらなる被害拡大の防止を図ることができることがわかった。
3. 地盤－構造物一体型モデルの解析法の検討として応答震度法を取り上げ、地盤の非線形性や加速度の設定方法がトンネルの応答に及ぼす影響について解析的検討を実施した。その結果、応答震度法において地盤を非線形として取り扱い、動的解析における着目時刻の加速度をそのまま用いた場合には、トンネルの応答が過小評価となる危険性がある一方、最大せん断応力から換算した加速度を用いることにより、地盤を非線形とした応答震度法でも、動的解析の着目時刻における応答を概ね再現することができることを示した。
4. 開削トンネルの耐震対策法として、(1)トンネルにおける鉄筋の付着を切った新しい構造形式、および(2)隅角部付近の地盤剛性を低下させる構造形式の2つを提案し、その効果を検証した。(1)については、特に地盤に比べてトンネルが大きく変形するケースにおいて、鉄筋の付着強度を弱めることでトンネルの変形が頭打ちになり、大きく曲げ損傷する部材の損傷が抑制されるとともに、せん断破壊を防止できる効果もあり、提案手法が耐震対策法として有効であることを示した。また、(2)については、隅角部付近の地盤剛性を小さくすることで、トンネル部材の部材力や変形が低減できる可能性があることを示すとともに、改良範囲や地盤剛性低減率を変化させた場合の効果について検証した。

以上より、本論文は部材の破壊進展と構造物の不静定性を考慮した開削トンネルの耐震性能の合理的な評価に関して、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成31年1月23日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。